

文章编号:1005-0523(2018)05-0078-07

高炉渣改良填料压缩试验分析

黄大维¹,刘香²,许有俊²,徐丽阳^{1,3}

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013;2. 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010; 3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心,浙江 杭州 310058)

摘要:利用大型直剪仪对高炉渣改良填料进行大型压缩试验,得到加载、卸载及再加载各阶段的侧限变形模量,试验结果分析表明:因细颗粒含量少且大粒径颗粒的水稳定性良好,含水量对填料的压缩性基本没有影响;第一次加载过程中的压缩量主要由颗粒的棱角压至粉碎及长扁状颗粒折断破裂导致。考虑到现场地基填筑时采用了强夯施工,地基沉降计算的压缩模量建议取室内压缩试验二次加载对应阶段的压缩模量。为了减小粗颗粒的应力集中,并充分发挥粉煤灰的后期板结作用,建议增加改良填料的细颗粒含量。

关键词:高炉渣;重锤夯实;压缩试验;侧限变形模量

中图分类号:TU41

文献标志码:A

随着工业的快速发展,每年钢铁产量也越来越大,钢铁工业产生固体废弃物的总量越来越多。相比国外某些发达国家对高炉渣的总体利用达到90%,我国高炉渣的利用率相对较低,且大量的高炉渣堆放造成土地占用^[1]。为减少废渣占用场地,如何大量利用与消纳高炉渣成为钢铁生产中迫切需要解决的问题,调研分析表明,高炉渣用于填筑地基或路基成为大量消纳高炉渣主要手段^[2-3]。当高炉渣用于高填方地基或路基时,为了减少工后沉降,并对填料的颗粒粒径进行改良,常采用重锤强夯法进行压实施工^[4-5]。但改良后的填料颗粒粒径较大,一般属于粗颗粒土,为了计算高填方地基或路基的工后沉降,一般要通过大型压缩试验获取填料的压缩模量^[6-7],而大型压缩试验仪在科研单位中并不普遍。因此如何测得高炉渣改良填料的压缩模量,以及高炉渣改良填料的室内压缩试验结果如何利用,均对高填方地基或路基工后沉降计算至关重要。

因粗颗粒土松散,在进行大型压缩试验时无法现场取得原状土样,必须进行室内制样。在重锤强夯地基时重锤与土体的接触应力一般要远大于后期上部土体的作用力,因此具有类似超载预压的效果,而室内采用扰动土进行制样时难以达到现场的土体压实状态。本文采用大型直剪仪创新性地对高炉渣改良填料进行了压缩试验,对高炉渣改良填料的压缩试验结果的特点进行了分析,并对沉降计算时的压缩模量合理取值给出了建议。

1 工程概况

1.1 工程简介

某钢铁厂机械设备对地基承载力及工后沉降要求高,设计初期拟采用钻孔灌注桩及CFG桩复合地基。但为满足拟建场地的高程要求,场地基础需进行填土,填方数量大,且近距离素土紧缺,而灰渣坝堆积高炉渣体量大。为此,在综合考虑经济、社会及环境效益的基础上,最终确定了采用换填法进行地基处理,即施工

收稿日期:2018-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51608200);内蒙古自然科学基金项目(2013MS0730)

作者简介:黄大维(1984—),男,讲师,博士,主要研究方向为地下铁道与岩土工程。

前清除表层杂填土约 5 m,再填筑高炉渣与粉煤灰混合料,设计的高炉渣与粉煤灰体积比为 5:1。施工时先分层碾压(摊铺厚度约为 0.5 m),再进行重锤夯实(单击夯击能为 3 000 kN·m,夯压层厚度约为 5 m),填方的最大厚度约为 15 m。

1.2 填料级配特性

高炉渣是钢铁冶炼过程中产生的固体废弃物,形状不规则,颗粒粒径大,颗粒内部含有一定量的孔隙,颗粒内部平均孔隙率约为 10.5%,高炉渣颗粒实体密度(测定前将大粒径高炉渣击碎,颗粒内部不含封闭孔隙,采用量瓶法测定)为 2.535 g/cm³。颗粒分析得到高炉渣的级配曲线如图 1 的曲线 1 所示,颗粒组成指标如表 1 所示。从图 1 与表 1 中可看出,高炉渣大粒径颗粒含量高,若将大于 5 mm 的颗粒称为粗料,且粗料含量表示为 P_5 (粒径大于 5 mm 的质量占总质量的百分数)^[8],则高炉渣的 P_5 为 98.99%。通过计算,高炉渣的不均匀系数 $C_u=2.38$,曲率系数 $C_c=0.95$ 。根据《土工试验规程》(SL237—1999)^[9]中的相关规定,判断高炉渣为级配不良,土的分类为巨粒混合土。

高炉渣在完成掺拌粉煤灰、分层碾压及重锤夯实后,通过现场再次分层开挖取样,结果表明,各层填料的颗粒组成非常接近,各层填料等量拌和后混合土样级配曲线如图 1 的曲线 2 所示,颗粒组成指标如表 1 所示,其 P_5 为 87.56%,不均匀系数 $C_u=6.58$,曲率系数 $C_c=1.29$,混合土样级配良好,土的分类为砾类土。由此可见,通过掺拌、碾压及重锤夯实,填料的细颗粒明显增加,高炉渣填料的级配性得到了良好地改善。

根据规范^[9]规定,大型压缩试验的土样最大粒径不应超过 60 mm。为此,将混合土样过孔径为 60 mm 的分析筛,得到了压缩试验土样,其级配曲线如图 1 的曲线 3 所示,颗粒组成指标如表 1 所示。从图 1 的曲线 2 与曲线 3 可看出,压缩试验土样与混合土样的颗粒级配接近。

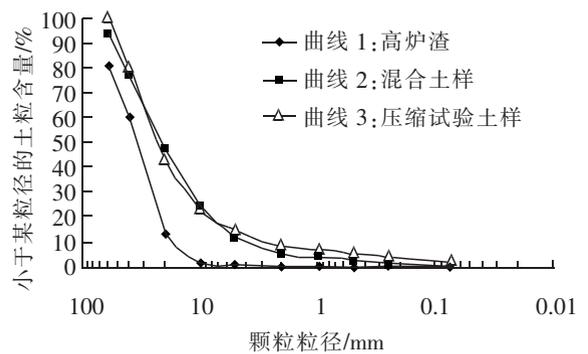


图 1 高炉渣与填料试样的级配曲线
Fig.1 Grading curves of the blast furnace slag and the filler sample

表 1 高炉渣与改良填料的颗粒组成指标

Tab.1 Index of particle composition for the blast furnace slag and the improved filler sample

土样来源	$d \leq 0.075$ mm 的含量/%	$d \geq 5$ mm 的含量/%	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	颗粒级配	土的分类	土的名称
高炉渣	0.15	98.99	2.38	0.95	不良	巨粒混合土	卵石混合土
混合土样	1.27	87.56	6.58	1.29	良好	砾类土	级配良好砾
压缩试验土样	2.48	85.34	9.66	1.86	良好	砾类土	级配良好砾

注:颗粒级配分为良好($C_u \geq 5$,并且 $C_c = 1 \sim 3$)和不良($C_u < 5$,并且 $C_c \neq 1 \sim 3$),其中不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10}$,曲率系数 $C_c = d_{30}/(d_{10} \times d_{60})$, d_{10} , d_{30} , d_{60} 分别为颗粒级配曲线上相应于 10%,30%,60%含量的粒径。

2 试验仪器与试验方案

2.1 试验仪器及制样方法

当地基沉降量计算时,必须先取得填土的压缩性指标。在一般工程中,常用侧限条件下土的室内压缩试验来测定土的压缩性指标,用压缩系数 a_v 或压缩模量 E_s 来评价土体的压缩性。粗颗粒土大粒径颗粒含量高,必须采用大型压缩仪进行试验,《土工试验规程》(SL237—1999)^[9]中的规定,固结容器的直径(D)与高度

(H)之比为 2~2.5,普遍采用的是大浮环式压缩仪。因大型压缩仪在科研单位中并不普遍,而大型直剪仪相对较为普遍,为此,本次大型压缩试验创新性地采用了大型直剪仪完成。试验所用的大型直剪仪为应力与应变双控式大型直剪仪。试验时将上下剪切盒对齐,加载及量测采用计算机控制。剪切盒为长方体型,其内部尺寸为:长 \times 宽 \times 高=600 mm \times 400 mm \times 210 mm(下剪切盒高度为 100 mm,上剪切盒高度为 110 mm,装样时预留约 10 mm 用于放置法向加载板),压缩试验时分级施加法向压力,法向可施工加的最大压力为 200 kN。

高炉渣改良后的填料松散,现场无法取得原状土样进行试验,必须采用扰动土进行室内制样。由图 1 与表 1 可知,试验土样大粒径颗粒含量多,制样时极易出现粗细颗粒离析现象,且室内离析程度远大于现场。为避免粗细颗粒离析现象发生,在制样前将试样分为粗细颗粒两部分(粗细颗粒的界限粒径约为 10 mm),制样时先将约 1/3 的粗颗粒倒入直剪盒,将粗颗粒摊平后再倒入约 1/3 的细颗粒,再将细颗粒摊平并用小铁铲与铁棍捣实,直到表面粗细颗粒均匀。如此分 3 次完成,每层厚度近似。

2.2 试验方案

本次大型压缩试验的主要目的是测定高炉渣改良填料在完成掺拌、碾压及夯实后的压缩性指标,以及填料含水率对压缩性指标的影响。试验时每次装样方法及捣实工艺相同,其中第 1 次压缩试验后的试样在第 2、3 次压缩试验时依次使用,因试验后对填料的级配稍有改变,且每次填料的粗细颗粒离析程度稍有区别,加上每次装样时顶部用于顶板加载的预留深度稍有区别(设计时预留深度为 10 mm,即剪切盒内部高度为 210 mm),因此每次所用试样质量也稍有区别。表 2 为 3 次压缩试验时的试样情况,其中干料是在室内风干,湿料含水率 8%是相对试样中粒径小于 5 mm 的颗粒进行计算(填料的最优含水量约为 6.5%也是对试样中粒径小于 5 mm 的颗粒进行测定);干密度按上下剪切盒叠加在一起时体积 $V=20\times 40\times 60\text{ cm}^3$ 近似计算。

压缩试验采用分级加载、分级卸载与分级再加载的方式进行。第 1 次加载时法向应力分别为:50,100,200,300,500,700 kPa;卸载时为:500,300,100,50 kPa;第 2 次再加载时为:100,300,500,700 kPa。每一级加(卸)载在 2 min 内加载板竖向位移未发生变化时,则进行下一级加(卸)载。

表 2 试验方案
Tab.2 Experiment scheme

试验编号	含水率/%	试样干质量/kg	干密度/(g/cm ³)	初始孔隙比
1	0	75	1.56	0.460 2
2	0	79.4	1.65	0.380 1
3	8	86.3	1.80	0.268 7

3 试验结果分析

3.1 高炉渣改良填料压缩特性

图 2 为 3 次压缩试验各级加(卸)载时加载板位移稳定后的“沉降量-竖向压应力”关系曲线,从图中可看出,3 次压缩试验的加载板沉降量在第 1 次加载时的前三级加载稍有差别,其他各级加(卸)载的加载板沉降量都接近。根据侧限变形模量 E_s 定义,取曲线上任意一小段割线斜率作为相应于该段应力范围的土的侧限变形模量,其计算式如下

$$E_s = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma'$ 为有效应力增量,因试样的细颗粒含量少,试验透水性良好,不存在孔隙水压力,则总应力即为有效应力; $\Delta\varepsilon$ 为压缩应变增量。

根据式(1)得到了不同加(卸)载阶段的侧限变形模量 E_s 如表 3 所示。从表 3 可看出,高炉渣改良填料的干料与湿料的压缩性非常接近,说明颗粒具有良好的水稳定性。填料细颗粒含量少,细颗粒几乎未参与土体骨架的形成,因此含水量对填料的压缩性影响小。

表 3 不同加(卸)载阶段的侧限压缩模量 E_s
Tab.3 Confining deformation modulus E_s for different stages of loading and unloading MPa

项目	加(卸)载阶段/kPa	1 号试验	2 号试验	3 号试验
加载	0→50	2.59	4.22	2.47
	50→100	8.95	6.05	8.95
	100→200	13.11	9.93	12.85
	200→300	14.27	14.18	16.33
	300→500	19.42	17.75	18.75
	500→700	23.69	20.81	21.49
卸载	700→500	81.50	85.40	85.11
	500→300	70.18	75.24	72.94
	300→100	55.94	62.02	57.28
	100→50	33.33	38.21	37.27
再加载	50→100	48.50	54.56	54.05
	100→300	55.10	64.34	58.39
	300→500	62.00	68.76	65.76
	500→700	48.00	50.53	51.73

从表 3 的侧限变形模量 E_s 可看出,在压力由 100 kPa 变为 200 kPa 时,3 次试验的 E_s 均小于 15 MPa,根据土力学^[10]给出的土体压缩性参考值(即压力由 100 kPa 变为 200 kPa 时侧限压缩模量小于 4 MPa 时为高压缩性,压缩模量为 4~20 MPa 时为中等压缩性,压缩模量大于 20 MPa 时为低压缩性),本次试验的高炉渣改良填料为中等压缩性土。

将不同加(卸)载阶段的 E_s 绘制成曲线,如图 3 所示(坐标点的横坐标取值为各级加(卸)载起止竖向压应力的平均值)。从图中可看出,第 1 次加载时的 E_s 较小,都小于 25 MPa;卸载时 E_s (应为回弹模量)总体最大,随着卸载量的增加, E_s 逐渐减小;再加载时的 E_s 先增大,后减小;再加载阶段的 E_s 比第 1 次加载阶段的 E_s 大了许多,主要与第 1 次加载时已消除了大部分的塑性变形有关。

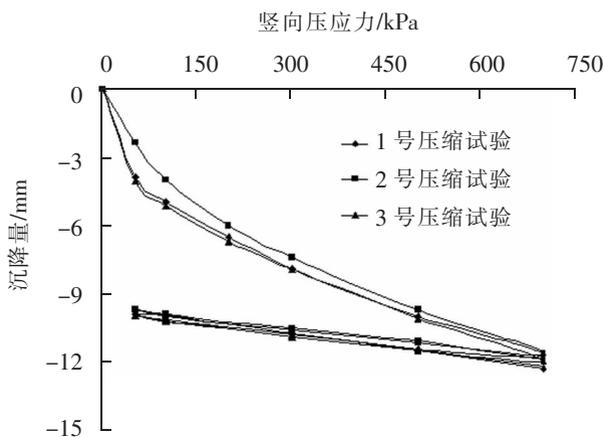


图 2 加载板沉降量与竖向压应力关系曲线
Fig.2 Curves of the loading plate settlement and vertical compressive stress

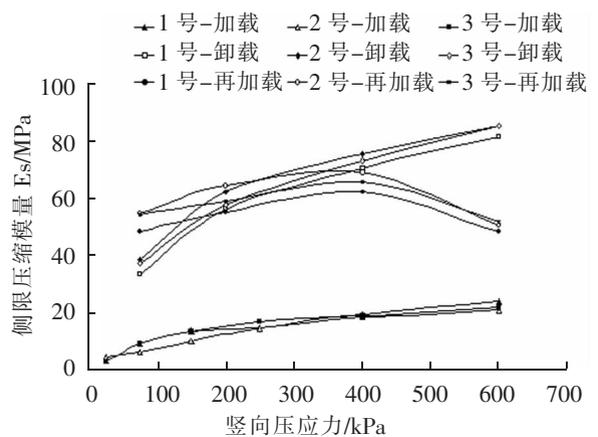


图 3 侧限压缩模量与竖向压应力关系曲线
Fig.3 Curves of confining deformation modulus and vertical compressive stress

3.2 重锤强夯地基的压缩模量取值建议

由颗粒分析可知,改良填料为粗颗粒填料,且颗粒的自身强度高,根据已有研究^[10-16],粗颗粒形成的土体骨架压缩性小,应属于低压缩性土,而本次试验的高炉渣改良填料为中等压缩性土。为此,将3次压缩试验的 $e-p$ 关系曲线绘制如图4所示(其中孔隙比 e 计算时的孔隙不包括试样颗粒内部的孔隙),并与某戈壁地区填料第1次加载时的 $e-p$ 关系曲线进行比较^[11]。

戈壁填料与高炉渣改良填料压缩试验土样的级配曲线如图5所示。比较发现,戈壁填料级配曲线比高炉渣改良填料级配曲线更加平缓,戈壁填料的细颗粒含量多。戈壁填料中大于5 mm的颗粒占试样总质量的58.7%,小于0.075 mm的颗粒占试样总质量的6.1%,不均匀系数 C_u 为25.93,曲率系数 C_c 为2.12^[17],根据《土工试验规程》(SL237—1999)^[9]中的相关规定,判断戈壁填料级配良好,土的分类为含细粒土砾。戈壁填料为最优含水率(约7%)时不同压实系数下的 $e-p$ 关系曲线如图6所示。

图4第1次加载的 $e-p$ 关系曲线与图5的 $e-p$ 关系曲线比较可发现,高炉渣在第1次加载时的 $e-p$ 关系曲线斜率明显大于戈壁填料的 $e-p$ 关系曲线,尤其是前三级加载。图5中高炉渣改良填料在压力由100 kPa变为200 kPa时侧限压缩模量分别为22.05、23.88 MPa与25.25 MPa,明显大于高炉渣改良填料第1次加载压力由100 kPa变为200 kPa时的侧限压缩模量(9.93~13.11 MPa)。

高炉渣改良填料主要为高炉渣的破碎颗粒,填料颗粒具有明显的棱角。在室内扰动土制得的土样,压缩试验时棱角受压易导致应力集中,因此易发生粉碎;此外,因细颗粒含量少,细颗粒难以填充粗颗粒间的孔隙,压缩试验时大粒径长扁状颗粒内部出现了拉应力而折断破碎,如图7所示。因此,室内压缩试验时高炉渣改良填料为中等压缩性土。为使细颗粒良好地填充粗颗粒间的孔隙,并充分发挥粉煤灰的后期板结作用,应增加改良填料的细颗粒含量。

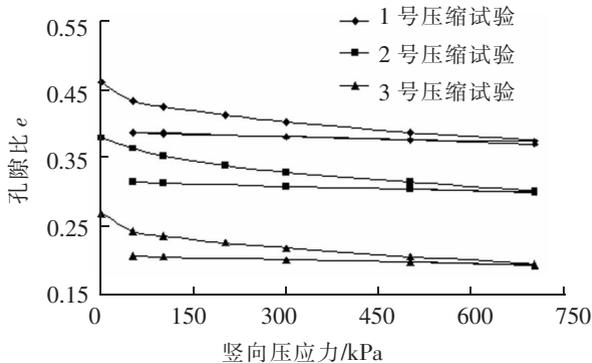


图4 高炉渣改良填料 $e-p$ 关系曲线

Fig.4 $e-p$ curves of the improved filler from blast furnace slag

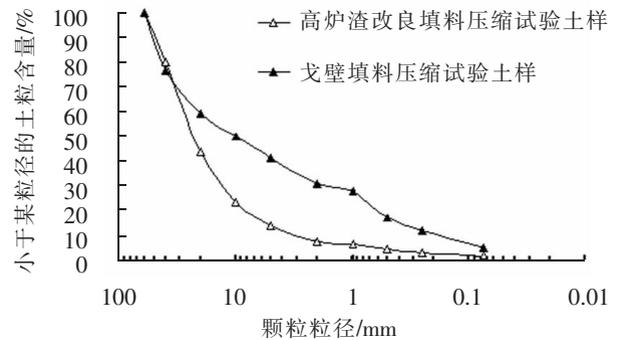


图5 戈壁填料与高炉渣改良填料级配曲线

Fig.5 Grading curves of the gobi area filler and blast furnace slag and the filler sample

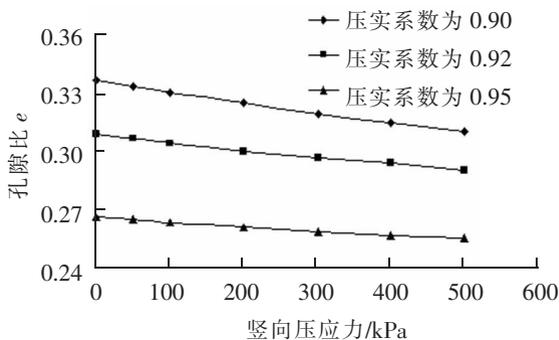


图6 戈壁填料 $e-p$ 关系曲线^[11]

Fig.6 $e-p$ curves of the gobi area filler^[11]



图7 颗粒棱角压碎与长扁状颗粒折断

Fig.7 Edges and corners smash and long flat shape particles breaking off

高炉渣改良填料换填地基在现场施工时采用了重锤强夯压实,强夯时将大部分处于应力集中颗粒棱角压至粉碎,并将出现过大大拉应力的大粒径长扁状颗粒折断破碎。夯锤在落地时与土体接触压力远大于后期上部荷载导致作用力,强夯地基处理具有类似于堆载预压的效果,而室内采用扰动土体制得的试验土样难以达到现场强夯后的土体压实与颗粒接触状态。因此,高炉渣改良填料高填方地基压缩性分析评价时建议取2次加载时的压缩模量。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)^[18]给出的地基最终变形计算公式为

$$S = \psi_s S' \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i a_i - z_{i-1} a_{i-1}) \quad (2)$$

式中: S 为地基最终变形量,mm; ψ_s 为沉降计算经验系数; S' 为按分层总和法计算出的地基变形量; p_0 为相应于作用的准永久组合时基础底面处的附加压力,kPa; E_{si} 为基础底面下第*i*层土的压缩模量,MPa,应取土的自重压力至自重应力与附加应力之和的应力计算; z_i, z_{i-1} 为基础底面到第*i*层土、第*i-1*层土底面的距离,m; a_i, a_{i-1} 为基础底面计算点到第*i*层土、第*i-1*层土底面范围内平均附加应力系数。

压缩模量 E_{si} 在室内测定时,建议先分级加载到施工过程中作用的最大荷载(采用重锤强夯时,取夯锤落地时的接触应力;采用堆载预压时,取堆载过程中该土层的最大压力)后进行卸载,再分级加载,最后求出不同再加载段的压缩模量 E_{si} 作地基或路基沉降计算时的压缩模量。

4 结论

1) 用大型直剪仪对高炉渣改良填料进行了大型压缩试验,试验结果表明,因填料的细颗粒含量少,细颗粒几乎未参与土体骨架的形成,且高炉渣颗粒水稳定性较好,含水量对高炉渣改良填料的压缩性基本没有影响。

2) 高炉渣改良填料主要由大粒径高炉渣在碾压与重锤夯实作用下破碎所得,压缩试验的土体主要由具有明显棱角的颗粒相互接触所形成的骨架,室内压缩试验第1次加载过程中的压缩量主要由颗粒的棱角压至粉碎及长扁状大粒径颗粒折断破碎所导致。因此,尽管高炉渣改良填料为粗颗粒土,但室内大型压缩试验在第1次加载时仍属于中等压缩性土。

3) 高炉渣改良填料室内压缩试验使用扰动土进行制样,难以达到现场重锤强夯施工后土体压实与颗粒接触状态。考虑到强夯施工的特点,地基沉降计算的压缩模量 E_{si} 在室内测定时,建议先分级加载到施工过程中的接触应力后进行卸载,再分级加载,最后求出2次加载不同阶段的压缩模量 E_{si} 作为地基沉降计算的压缩模量。

4) 分析表明,高炉渣改良填料细颗粒含量少,细颗粒难以填充粗颗粒间的孔隙,导致填土受压时大粒径颗粒内部易出现较大的应力集中与长扁状大粒径颗粒内部出现了拉应力而折断破碎,对减小填土长期沉降不利,也难以发挥粉煤灰的后期板结作用,为此建议增加改良填料的细颗粒含量。

参考文献:

- [1] 高洋, 贵永亮, 宋春燕, 等. 高炉渣显热回收利用现状和展望[J]. 矿产综合利用, 2018(1): 12-16.
- [2] 金霞, 李辽沙, 董元麓. 国内外高炉渣资源化技术发展现状和展望[J]. 中国资源综合利用, 2005(9): 4-7.
- [3] 王海风, 张春霞, 齐渊洪. 高炉渣处理和热能回收的现状与发展方向[J]. 中国冶金, 2007, 17(6): 53-58.
- [4] 杨有海, 赖国泉. 戈壁地区高速铁路路基填筑试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 1-7.
- [5] 高政国, 杜雨龙, 黄晓波, 等. 碎石填筑场地强夯加固机制及施工工艺[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 377-384.
- [6] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950-954.
- [7] 陈晓斌, 张家生, 封志鹏. 红砂岩粗粒土流变工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 601-607.
- [8] 黄大维, 杨有海, 黄纪强, 等. 戈壁粗粒土填料填筑铁路路基压实评价指标研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 21-27.

- [9] 中华人民共和国水利部. SL 237—1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [10] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
- [11] 张文学. 戈壁地区高速铁路粗粒土填料室内及现场试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.
- [12] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,1992.
- [13] 丁洲祥,朱合华,龚晓南,等. 压缩试验本构关系的大变形表述法[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1356-1364.
- [14] 程展林,丁红顺,吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(8):1151-1158.
- [15] 杨有海,黄大维,赖国泉,等. 高速铁路路基戈壁填料地基系数与变形模量分析[J]. 岩土力学,2011,32(7):2057-2057.
- [16] 杨园野,丁海滨,赵秀绍,等. 含红砂岩砾黏土路基碾压特性及效果研究[J]. 华东交通大学学报,2017,34(3):34-39.
- [17] 黄大维,杨有海,赖国泉,等. 高速铁路路基动态变形模量分析[J]. 岩土力学,2012,33(5):1402-1408.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

Analysis of Compression Test for the Improved Filler from Blast Furnace Slag

Huang Dawei¹, Liu Xiang², Xu Youjun², Xu Liyang^{1,3}

(1. Engineering Research Center for Railway Environmental Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Large-scale compression test for the improved filler from blast furnace slag by the large direct shear apparatus was carried out, and the confining deformation modulus of different stages in the loading, unloading and reloading was obtained. The research results show that water content has little influence on the compressibility of the filler, as there are few fine particles in the filler and the coarse particles have good water stability. Compression in the first stage of loading mainly results from smash of edges and corners and breaking off of long flat shape particles. The settlement calculation of the foundation should refer to the deformation modulus at the stage of reloading when the foundation is constructed by dynamic consolidation. The content of fine particles should be increased for the improved filler from blast furnace slag to reduce stress concentration of coarse particles and make the best use of coherence of the flyash.

Key words: blast furnace slag; heavy tamping; compression test; confining deformation modulus